

CON. US 6,647,798 B2  
+ US 2002/0194927 A1

**Bearing load measuring system for use in liquid fuel rocket engine, has double-cylinder type cartridge whose inner cylindrical portion is made to contact bearing balls for measuring bearing load**

**Patent number:** FR2826117

**Publication date:** 2002-12-20

**Inventor:** YOSHIDA MAKOTO; OIKE MAMORU; NOSAKA MASATAKA; KIKUCHI MASATAKA; SUDO TAKAYUKI; WATANABE YOSHIAKI

**Applicant:** NAT AEROSPACE LAB (JP)

**Classification:**

- **International:** G01L5/00; G01L5/00; (IPC1-7): G01M13/00; G01L1/22; G01L5/00

- **European:** G01L5/00C

**Application number:** FR20020007254 20020613

**Priority number(s):** JP20010178408 20010613

**Also published as:**



US6647798 (B2)

US2002194927 (A1)

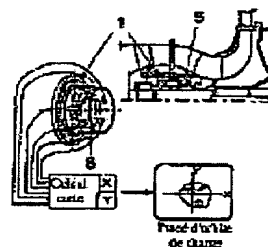
JP2002372467 (A)

**Report a data error here**

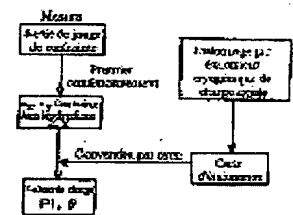
**Abstract of FR2826117**

The system has double-cylinder type cartridge whose inner cylindrical portion is made to internally contact the bearing balls and an outer cylindrical portion is connected to the inner cylindrical portion through a ring-type support. The strain gauges for measuring bearing load are arranged on the surface of the outer cylindrical portion.

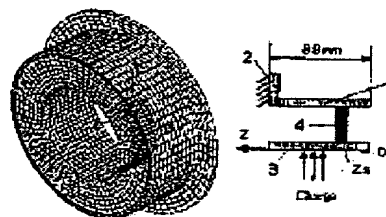
**BEST AVAILABLE COPY**



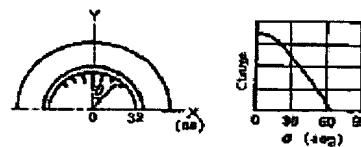
Système de mesure de charge statique



Processus de mesure du moment de charge



Modèle



①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①① N° de publication : 2 826 117

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : 02 07254

⑤① Int Cl<sup>7</sup> : G 01 M 13/00, G 01 L 1/22, 5/00

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 13.06.02.

③⑦ Priorité : 13.06.01 JP 01178408.

④③ Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 20.12.02 Bulletin 02/51.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été  
établi à la date de publication de la demande.*

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦① Demandeur(s) : NATIONAL AEROSPACE LABORA-  
TORY OF JAPAN — JP.

⑦② Inventeur(s) : YOSHIDA MAKOTO, OIKE MAMORU,  
NOSAKA MASATAKA, KIKUCHI MASATAKA, SUDO  
TAKAYUKI et WATANABE YOSHIKI.

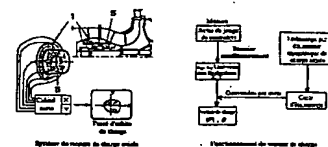
⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : CABINET HERRBURGER.

⑤④ SYSTÈME DE MESURE DE CHARGE DE PALIER UTILISANT UNE CARTOUCHE DE TYPE A DOUBLE  
CYLINDRE.

⑤⑦ Système de mesure de charge de palier qui utilise une  
cartouche de palier (1) comme cellule de charge pour mesurer la charge de palier dans une machine rotative utilisant un palier radial comportant des billes de roulement.

La cartouche de palier (1) est construite sous la forme d'une cartouche de type à double cylindre constituée d'une partie cylindrique intérieure (13) venant en contact interne avec le chemin de roulement extérieur dans lequel passent les billes de roulement, et d'une partie cylindrique extérieure (11) qui est reliée à la partie cylindrique intérieure (13) par un élément de support en forme d'anneau (14); et la charge de palier est mesurée par des jauges de contrainte (5) qui sont disposées sur la surface de la partie cylindrique extérieure.



FR 2 826 117 - A1



**ARRIERE PLAN DE L'INVENTION****1. Domaine de l'invention**

La présente invention concerne un système de mesure de charge de palier pour séparer et mesurer la charge radiale et le moment de charge agissant sur les paliers d'une machine rotative utilisant des paliers de type rotatif munis de corps de roulement. Ainsi, l'invention concerne un système de mesure de charge de palier qui utilise une cartouche de palier comme cellule de charge pour mesurer la charge de palier dans une machine rotative utilisant un palier radial comportant des billes de roulement.

**2. Description de la technologie concernée**

Des systèmes de transport spatiaux plus économiques que les systèmes actuellement utilisés seront nécessaires dans les activités spatiales futures, et il existe actuellement une forte demande pour la réalisation de systèmes de transport spatiaux réutilisables. A en juger par la technologie existante, il est réaliste de s'attendre à ce que des moteurs de fusées à combustible liquide soient utilisés comme systèmes de propulsion dans ces cas là. L'un des éléments constitutifs les plus importants de ces moteurs de fusées à combustible liquide, est la turbopompe. Pour réaliser des systèmes de transport spatiaux réutilisables, il faudra utiliser des moteurs de fusées présentant une plus grande fiabilité et une plus longue durée de vie utile que ceux qu'on trouve actuellement dans ces turbopompes. Cependant, dans le cas de turbopompes de fusées dans lesquels on a recherché une taille plus petite et un poids plus léger, suivant l'augmentation voulue de la vitesse, la vibration radiale provoquée par des forces de fluide instables est un problème qui se pose dans le prolongement de la durée de vie utile. La raison en est qu'une vibration radiale excessive provoque une chute de durabilité et conduit en même temps à des accidents mortels. Par suite, il apparaît que s'il était possible de mesurer la charge radiale générée par une vibration radiale, l'information obtenue par cette mesure pourrait être effectivement utilisée dans un système de surveillance d'intégrité ou pour prendre des mesures visant à supprimer la vibration radiale.

Le système de mesure de charge radiale faisant l'objet de la présente invention est un système qui utilise la cartouche de palier d'une turbopompe comme cellule de charge, et qui permet de mesurer la charge radiale sans produire une augmentation du poids ou une variation importante quelconque des caractéristiques de vibration du système d'arbre

rotatif. Une telle technique de mesure de la charge agissant sur un palier, utilisant cette cartouche de palier, a donné des résultats lorsqu'elle est utilisée dans les turbopompes à oxygène liquide des moteurs principaux de la Navette Spatiale U.S. Cependant, toutes les charges mesurées ont  
5 été traitées comme des charges radiales. Cette cartouche de mesure de charge de palier est représentée dans la figure 1. La partie rotative du palier est construite à partir d'un chemin de roulement intérieur 2 qui tourne solidairement de l'arbre, et d'un chemin de roulement extérieur 3 qui ne tourne pas avec la cartouche de palier 1, tandis que des billes de  
10 roulement 4 sont interposées entre les deux chemins de roulement.

Cependant, la quantité physique mesurée dans ce cas est en fait une charge dans laquelle la charge radiale et le moment de charge sont combinés. Dans un système conventionnel de ce type, il est impossible d'effectuer des mesures séparées. De plus, au cours de recherches ef-  
15 fectuées dans le passé par le présent groupe d'inventeurs, on a constaté, comme résultat d'investigations et d'expériences effectuées en utilisant une cartouche de palier (représentée à la figure 2) plus ou moins du même type que celui de la cartouche de palier de la turbopompe à oxygène li-  
quide LE-7 du moteur principal du premier étage de la fusée H-2, que le  
20 signal de sortie de la jauge de contrainte tendait à être affecté par les positions des billes de roulement.

### **RESUME DE L'INVENTION**

La présente invention a pour but de créer un système qui permette de mesurer des charges radiales en utilisant la cartouche de pa-  
25 lier d'une turbopompe comme cellule de charge, sans produire une augmentation de poids quelconque ou une variation importante quelconque des caractéristiques de vibration du système d'arbre rotatif, tandis que la charge radiale et le moment de charge agissant sur le palier peuvent être mesurés séparément sans que le signal de sortie de la jauge de contrainte  
30 soit affecté par les positions des billes de roulement.

A cet effet, le système de mesure de charge de palier de la présente invention est un système qui mesure des charges de palier en utilisant une cartouche de palier comme cellule de charge. Cette cartou-  
35 che de palier est construite sous la forme d'une cartouche de type à double cylindre consistant en une partie cylindrique intérieure venant en contact interne avec le chemin de roulement extérieur dans lequel passent les billes de roulement, et en une partie cylindrique extérieure reliée à la partie cylindrique intérieure par l'intermédiaire d'un élément de support

de forme annulaire. La charge de palier est mesurée par des jauges de contrainte qui sont disposées sur la surface de la partie cylindrique extérieure indiquée ci-dessus.

De plus, les positions dans lesquelles sont disposées les jauges de contrainte sont définies comme deux points où la phase de la contrainte est différente et où la contrainte est grande d'après la relation entre la quantité de contrainte et la position constituée sur la surface supérieure de la cartouche dans la direction axiale, lorsqu'une charge spécifiée est appliquée dans la direction radiale, dans une analyse effectuée par le procédé des éléments finis, et qui satisfait la condition selon laquelle il n'y a que peu d'effet lorsqu'on fait varier le moment de la charge en faisant varier le point d'application de la charge dans la direction axiale.

En outre, la position d'attache dans la direction axiale de l'élément de forme annulaire qui relie la partie cylindrique intérieure à la partie cylindrique extérieure, est déterminée en utilisant comme norme l'effet minimal du moment de charge de la contrainte dans la direction circonférentielle.

De plus, le nombre de jauges de contrainte est défini comme un nombre constitué d'une pluralité d'ensembles disposés dans la direction circonférentielle, chaque ensemble consistant en une paire de jauges de contrainte dans des positions dans lesquelles la phase est différente dans la direction axiale.

En outre, la position d'attache dans la direction axiale de l'élément de forme annulaire reliant la partie cylindrique intérieure à la partie cylindrique extérieure, est déterminée en utilisant comme norme l'effet minimal du moment de charge de la contrainte dans la direction circonférentielle.

Des jauges de contraintes sont disposées sur la surface extérieure de la partie cylindrique extérieure dans des positions axiales qui reçoivent l'effet maximum du moment de la charge, et le moment de la charge est mesuré à partir de la différence de signaux de sortie entre ces jauges de contrainte et les jauges de contrainte disposées dans les positions dans lesquelles l'effet du moment de la charge est minimal.

#### **BREVE DESCRIPTION DES DESSINS**

La présente invention sera décrite ci-après de manière plus détaillée à l'aide de modes de réalisation représentés sur les dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente la cartouche utilisée pour la mesure de charge de palier dans la turbopompe à oxygène liquide du moteur principal de la Navette Spatiale U.S. ;
- la figure 2 représente la cartouche de palier dans la turbopompe à oxygène liquide LE-7 du moteur principal du premier étage de la fusée japonaise H-2 ;
- la figure 3-1 représente un schéma d'ensemble du système de mesure de charge axiale proposé par la présente invention ;
- la figure 3-2 représente l'organigramme des calculs entre la sortie de détection de la jauge de contrainte et le calcul du vecteur de charge dans le présent système ;
- la figure 4 est un diagramme qui représente le déplacement sur la circonférence du bout d'extrémité du cylindre lorsqu'une charge est appliquée au bout d'extrémité ;
- la figure 5 représente un modèle calculé de la forme de cartouche de palier nouvellement proposée ;
- la figure 6 est un diagramme qui représente la charge répartie dans la direction circonférentielle lorsqu'une charge de 200 (kgf) est appliquée du dessus ;
- la figure 7 est un graphique qui représente les résultats ayant été obtenus lorsqu'on a mesuré la contrainte circonférentielle et la contrainte axiale sur la surface supérieure de la cartouche ;
- la figure 8 est un graphique qui représente la relation entre la contrainte sur la surface supérieure de la cartouche et l'angle de phase ;
- la figure 9 est un graphique qui représente l'effet du moment de charge sur la sortie de contrainte lorsqu'on fait varier la position  $Z_s$  de l'anneau de support ;
- la figure 10 représente un mode de réalisation de la cartouche de type à double cylindre de la présente invention ;
- la figure 11 est un graphique qui représente la distribution de phase et la distribution de contrainte circonférentielle sur la surface du cylindre extérieur dans les cas où l'on applique des moments de charge différents ;
- la figure 12 est un diagramme schématique d'un ensemble d'étalonnage et de test de charge axiale pour la cartouche de type à double cylindre ;
- la figure 13-1 est un graphique qui compare les résultats mesurés aux résultats calculés pour la contrainte, en fonction de l'angle  $\theta$  ;

- la figure 13-2 est un graphique qui représente la relation entre la jauge de contrainte et la position des billes ;
- la figure 13-3 est un graphique qui représente la contrainte en fonction de la charge dans ce cas ;
- 5 - la figure 14-1 est un graphique qui représente les résultats ayant été obtenus lorsqu'on a effectué une analyse par transformation de Fourier rapide (FFT) pour la contrainte mesurée dans le présent mode de réalisation ;
- la figure 14-2 représente une carte de contrainte qu'on a préparée en effectuant un test d'étalonnage dans un environnement à la température ordinaire, et en effectuant un traitement primaire ;
- 10 - la figure 15 représente les conditions de test utilisées et les résultats obtenus dans un cas dans lequel on a appliqué une charge à un seul sens sur la cartouche du présent mode de réalisation, au moyen d'un piston de poussée de charge radiale ; et
- 15 - la figure 16 représente les conditions de test utilisées et les résultats obtenus dans un cas dans lequel on a fait tourner une masse de dés-équilibre à une vitesse élevée de 5000 tours/mn sur la cartouche du présent mode de réalisation.

## 20 **DESCRIPTION DES MODES DE REALISATION PREFERENTIELS**

Un schéma d'ensemble du système de mesure de charge radiale proposé par la présente invention, est représenté dans la figure 3-1. Ce système est un système dans lequel un certain nombre de jauges de contrainte 5 sont disposées dans la direction circonférentielle et collées à une cartouche de palier 1 qui est en fait incorporée dans une turbopompe, et dans lequel on mesure dynamiquement le vecteur de charge en soumettant les sorties des jauges de contrainte à un traitement de synthèse tandis qu'on contrôle la relation de position des jauges. De plus, la figure 3-2 représente l'organigramme des calculs entre la sorte de détection des jauges de contrainte et le calcul du vecteur de charge dans le présent système. Dans ce présent système, pour compenser la différence entre les valeurs obtenues dans les tests de charge effectués à terre, et la contrainte à laquelle la cartouche de palier est soumise dans le cas d'une utilisation réelle dans une turbopompe dans l'espace, il faut préparer une carte d'étalonnage au moyen d'un test d'étalonnage de charge axiale effectué

30  
35

détalonnage préalablement dans un environnement à température cryogénique.

Ensuite, la cartouche de palier ayant été soumise à ce test d'étalonnage est montée dans une turbopompe, et l'on effectue un test de



rotation à grande vitesse. Ensuite, les composantes x et y des grandeurs de contrainte sont tout d'abord calculées à partir des sorties de la pluralité de jauges de contrainte. Les grandeurs de contrainte calculées sont converties en utilisant la carte d'étalonnage, et le vecteur de charge est identifié.

On décrira maintenant le procédé d'analyse de sortie de base utilisé pour identifier le vecteur de charge dans la charge radiale de la présente invention. Pour identifier le vecteur de charge de la charge radiale, il faut clarifier la relation entre les grandeurs de contrainte locales de la cartouche de palier, et le vecteur de charge. Par suite, comme représenté dans la figure 4, une extrémité du cylindre est fixée et l'on considère le déplacement du bout d'extrémité de la partie cylindrique dans un cas dans lequel une charge est appliquée à l'autre extrémité dans la direction radiale à partir de l'intérieur.

Ici, dans un souci de simplicité, les orientations des jauges de contrainte 5 collées sur la circonférence de la cartouche de palier 1 à intervalles de 90°, sont amenées à coïncider avec l'axe x et l'axe y. De plus, l'angle formé par le vecteur de charge P et l'axe x est appelé  $\theta$ . Le déplacement du bout d'extrémité de la partie cylindrique, produit par le vecteur de charge, peut être considéré en première approximation comme la somme du déplacement  $\epsilon$  impliquant une courbure dans la direction de la charge à la manière d'une poutre en porte-à-faux, et la quantité de déplacement  $\eta$  produite par la déformation de la section transversale cylindrique en une section de forme elliptique en prenant la direction de la charge comme axe principal. La période de la composante  $\epsilon$  est de  $2\pi$ , et la période de la composante  $\eta$  est de  $\pi$ . Par suite, les sorties  $\delta$  des quatre jauges de contrainte 5 peuvent s'exprimer par les équations qui suivent.

Expression numérique 1

$$\delta_{+x}(|P|, \theta) = \epsilon_x(|P|, \theta) + \eta_x(|P|, \theta) = C_1(|P|) \cos \theta + C_2(|P|) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\delta_{-x}(|P|, \theta) = \delta_{+x}(|P|, \theta + \pi) = -C_1(|P|) \cos \theta + C_2(|P|) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\delta_{+y}(|P|, \theta) = \epsilon_y(|P|, \theta) + \eta_y(|P|, \theta) = -C_1(|P|) \sin \theta - C_2(|P|) \cos 2\theta \quad (3)$$

$$\delta_{-y}(|P|, \theta) = \delta_{+y}(|P|, \theta + \pi) = C_1(|P|) \sin \theta - C_2(|P|) \cos 2\theta \quad (4)$$

Ici, C1 et C2 sont des coefficients qui dépendent du vecteur de charge. Lorsque  $\epsilon$ , qui présente la même phase que le vecteur de charge, est séparé de  $\delta$  pour identifier le vecteur de charge à partir des

sorties des jauges de contrainte, les Equations (5) et (6) qui suivent sont obtenues à partir des Equations (1) à (4).

Expression numérique 2

$$\epsilon_x(|P|, \theta) = C_1(|P|) \cos \theta = \frac{1}{2}(\delta_{+x} - \delta_{-x}) \quad (5)$$

$$\epsilon_y(|P|, \theta) = C_1(|P|) \sin \theta = \frac{1}{2}(\delta_{-y} - \delta_{+y}) \quad (6)$$

5 Par suite, suivant les suppositions de cette analyse, il est généralement possible de déterminer le vecteur de charge en combinant les sorties des quatre jauges de contrainte disposées sur la circonférence, en extrayant uniquement les composantes  $\theta$  des déplacements, et en déterminant  $C_1(P)$  au moyen d'un test d'étalonnage.

10 Dans le but de supprimer les effets des positions relatives des billes de roulement et des jauges de contrainte sur les sorties des jauges, l'auteur de la présente invention a optimisé la forme de la cartouche de palier en utilisant le procédé à éléments finis (FEM). La figure 5 représente un modèle calculé de la forme de cartouche de palier nouvellement  
15 proposée. Plus spécifiquement, une extrémité d'une partie cylindrique extérieure 11 présentant une longueur de tube de 39 mm forme une collerette 12 qui est fixée, et une partie cylindrique intérieure 13 présentant la même longueur de 39 mm est solidarisée au moyen d'un anneau de support 14 placé dans une position Zs dans la direction axiale, en partant de  
20 la partie d'extrémité du cylindre extérieur qui ne constitue pas la collerette. La surface intérieure de la partie cylindrique extérieure indiquée ci-dessus, correspond à la partie qui vient en contact avec le chemin de roulement extérieur dans lequel passent les billes de roulement. Les éléments utilisés sont des éléments pleins à 8 points nodaux (petits hexaèdres) Pour  
25 supprimer les effets des billes de roulement, on a utilisé une forme à deux cylindres reliés par une partie de support de forme annulaire 14. De plus, comme il est concevable que les valeurs absolues des sorties de contrainte puissent être réduites en conséquence, on utilise un procédé à deux jauges de contrainte dans lequel les jauges de contrainte sont montées dans  
30 des positions où les grandeurs de contrainte sont inversées, et des ponts sont construits de façon que les sorties soient extraites de manière différentielle. De plus, les conditions de calcul ont été établies comme suit :

1. La grandeur de la charge est de 200 kgf, en supposant que la distribution est une distribution se conformant à la figure 6 pour la direc-

tion circonférentielle, et une distribution uniforme pour la direction axiale.

2. On fait varier  $Z_s$  par intervalles de 6 mm, depuis  $Z_s = 0$  mm jusqu'à  $Z_s = 24$  mm.

5 Ici,  $Z_s$  indique la position de l'anneau de support 14 dans la direction axiale.

Une analyse à éléments finis a été effectuée dans les conditions ci-dessus. Plus spécifiquement, les résultats ont été obtenus lorsque la contrainte circonférentielle et la contrainte axiale sur la surface supérieure de la cartouche, étaient calculées comme représenté dans la figure 7. L'angle  $\theta$  indique l'angle formé par la jauge de contrainte et le vecteur de charge dans chaque cas, tandis que  $Z$  indique la position dans la direction axiale de la cartouche. On peut voir d'après la figure 7 que, si la contrainte circonférentielle et la contrainte axiale présentent toutes les 10 deux des valeurs s'étendant dans les plages positive et négative, et si deux points ont été convenablement sélectionnés dans la direction axiale, la phase de la composante  $\theta$  de la contrainte sur la surface supérieure de la cartouche, est décalée de  $\pi$ , de sorte que le procédé à deux jauges peut être convenablement utilisé sur la surface supérieure de la cartouche. 15

20 On examinera maintenant les positions dans lesquelles les jauges de contrainte sont collées. Ici, la différence de phase entre la composante  $\theta$  de la contrainte et le vecteur de charge, est désignée par  $\Phi$ . Plus spécifiquement :

25  $\Phi = 0 \rightarrow$  le vecteur de charge et la composante  $\theta$  de la contrainte ont la même phase.

$\Phi = \pi \rightarrow$  le vecteur de charge et la composante  $\theta$  de la contrainte ont des phases opposées.

La figure 8 représente la relation entre la position dans la direction axiale de la cartouche, et l'angle de phase, ainsi que la valeur 30 absolue de la contrainte crête. Du point de vue de l'utilisation du procédé à deux jauges, tous les modèles nécessitent que les jauges de contrainte soient collées dans des positions où le rapport signal à bruit (S/N) présente une valeur maximum. Comme résultat d'une recherche effectuée dans ce sens, on a constaté qu'à la fois la contrainte circonférentielle et la 35 contrainte axiale dans chaque modèle dans lequel on faisait varier  $Z_s$ , présentaient la valeur crête positive maximum au voisinage de  $Z_s$  et la valeur crête négative maximum au voisinage de la collerette, comme représenté dans la figure 8.

On examinera ensuite les effets du décalage de la charge (moment de charge).

Condition 3. Les positions d'application de la charge étaient les trois positions suivantes :

- 5 - au voisinage du bout d'extrémité de la cartouche
- au voisinage du centre de la cartouche
- au voisinage de la collerette de la cartouche.

Une recherche a été effectuée pour s'assurer de ce que la composante  $\theta$  de la contrainte à la suite du traitement primaire, c'est à dire le rayon de la courbe à charge constante sur la carte d'étalonnage, est affectée par le moment de charge. La figure 9-1 montre les effets du moment de charge de la contrainte circonférentielle, et la figure 9-2 montre les effets du moment de charge de la contrainte axiale. Dans la figure 9, la grandeur de la valeur absolue de la pente indique la force de l'effet du moment de charge. Par suite, on peut voir d'après ces figures que, si l'on mesure la contrainte circonférentielle à  $Z_s=12$  mm, la charge radiale peut être identifiée sans considérer l'effet du moment de charge.

La recherche ci-dessus a montré qu'il convenait, dans le cas de ce modèle, de régler la position  $Z_s$  de l'anneau de support 14, à  $Z_s = 12$  mm. De plus, le graphique de la figure 8 a indiqué que les positions sur la surface extérieure de la partie cylindrique extérieure où les jauges de contrainte étaient collées, devaient être une combinaison d'une position au voisinage de  $Z_s$  où la valeur absolue maximum de la contrainte crête est représentée, et d'une position au voisinage de la partie de collerette où la phase est inversée et où la valeur absolue de la contrainte crête est grande. Dans un souci de simplicité, il est judicieux de monter quatre jauges de contrainte à intervalles de  $90^\circ$  dans la direction circonférentielle, pour obtenir un total de huit jauges de contrainte dans le procédé à deux jauges.

### 30 **Mode de réalisation 1**

La figure 10 représente un mode de réalisation d'une cartouche de type à double cylindre fabriquée comme prototype sur la base du procédé d'analyse indiqué ci-dessus. Cette cartouche a été fabriquée conformément à un diamètre de rotation extérieur de  $\Phi = 85$  mm, ce qui est une valeur standard pour des cartouches de turbopompes à oxygène liquide. Cette cartouche est une cartouche à double cylindre obtenue en optimisant une cartouche sans partie de support sur la surface d'extrémité, par une analyse utilisant le procédé à éléments finis. Dans ce mode

de réalisation, tel que représenté à la figure 10-1, la longueur de tube de la partie cylindrique extérieure 11 est de 57 mm, le diamètre intérieur est de  $\Phi = 98$  mm, le diamètre extérieur est de  $\Phi = 103$  mm, le diamètre de la collerette est de  $\Phi = 134$  mm, et l'épaisseur de la collerette est de 5 mm.

5 La cartouche comporte une partie de support de forme annulaire 14 de 3 mm d'épaisseur qui se relie à la partie cylindrique intérieure 13 en partant d'une position située à 12 mm de la partie de bout d'extrémité dans la direction axiale. La longueur de tube de cette partie cylindrique intérieure 13 est de 50 mm, son diamètre intérieur est de  $\Phi = 85$  mm, et son diamètre  
10 extérieur est de  $\Phi = 90$  mm. La cartouche présente une structure telle que la partie de surface intérieure vienne en contact avec des paliers respectifs des deux côtés avant et arrière d'une cloison prévue dans la partie centrale par rapport à la direction axiale.

Le graphique représenté dans la figure 11 montre la distribution  
15 de contrainte circonférentielle sur la surface du cylindre extérieur pour trois cas dans la même cartouche (c'est à dire au voisinage de la collerette de la cartouche, au voisinage du centre de la cartouche et au voisinage du bout d'extrémité de la cartouche), dans lesquels la charge radiale est la même tandis que la composante de moment de charge est très différente. Au voisinage de  $Z = 12$  à  $13$  mm, et au voisinage de  $Z = 30$  à  
20  $32$  mm, se trouvent des zones qui ne sont pratiquement pas affectées par le moment de charge. De plus, la phase de la contrainte dans ces zones est inversée (contrainte de tension au voisinage de  $Z = 12$  à  $13$  mm et contrainte de compression au voisinage de  $Z = 30$  à  $32$  mm). Par suite, si  
25 un circuit en pont est construit en combinant les jauges de contrainte dans ces deux positions, on peut obtenir simultanément un effet d'amplification basé sur la sortie différentielle, et un effet de compensation de température produit par l'annulation des variations de température. Quatre ensembles consistant en un total de huit jauges de contrainte, sont  
30 disposés sur la surface extérieure de la partie cylindrique extérieure en disposant des jauges de contrainte à intervalles de  $90^\circ$  dans la direction circonférentielle. De plus, si des capteurs de contrainte sont également appliqués sur la partie de bout d'extrémité du cylindre extérieur qui est la plus sensible aux effets du moment, et si des mesures sont effectuées si-  
35 multanément dans cette zone, on peut également mesurer le moment de charge.

Un test d'étalonnage de charge axiale a été effectué sur la cartouche de type à double cylindre indiquée ci-dessus. Un schéma d'en-

semble de l'appareil de test est représenté à la figure 12. Dans cet appareil, un arbre 10 est monté sur l'appareil et un support relié à la cartouche de palier est entraîné en rotation par un servomoteur à courant alternatif 21, par l'intermédiaire d'une chaîne 22, tandis qu'une charge orientée vers le haut est appliquée à ce support par une pression hydraulique. Par suite, une caractéristique spéciale de cet appareil est que le chemin de roulement extérieur tourne, à l'inverse du cas d'une turbopompe réelle. Cependant, considéré en termes relatifs, cela doit apparaître comme étant comparable à une turbopompe réelle. De plus, d'autres caractéristiques spéciales du présent appareil sont que la vitesse de rotation en tours/mn est réglée à une vitesse plus faible d'environ 1,5 tours/mn, et qu'un test d'étalonnage dans l'azote liquide peut être effectué en utilisant un réservoir cryogénique. La figure 13-1 représenté une comparaison entre les résultats d'une analyse par éléments finis, et les résultats expérimentaux obtenus dans le cas où la charge était de 200 kgf. Des carrés noirs indiquent les résultats expérimentaux qui étaient obtenus lorsque les jauges de contrainte étaient montées dans des positions situées à 13 mm et 45 mm du bout d'extrémité, et des cercles noirs indiquent les résultats calculés qui étaient obtenus lorsque les jauges de contrainte étaient montées dans des positions situées à 13 mm et 41 mm du bout d'extrémité. On constate que les deux ensembles de résultats font apparaître une extrêmement bonne correspondance.

De plus, on examinait également l'effet d'une variation des positions des jauges de contrainte et des billes de roulement, en utilisant la cartouche prototype du présent mode de réalisation. Comme représenté dans la figure 13-2, le cas où les jauges de contrainte étaient placées entre les billes de roulement, était appelé cas A, et le cas où les positions des jauges de contrainte et des billes de roulement coïncidaient, était appelé cas B. Les variations de la contrainte suivant la charge sont indiquées pour les cas respectifs dans la figure 13-3. Des carrés noirs indiquent le cas A tandis que des cercles noirs indiquent le cas B. On constate d'après la figure 13-3 que, dans le présent prototype, des variations des positions relatives des billes de roulement et des jauges de contrainte, n'ont pratiquement pas d'effet sur les sorties des jauges de contrainte. Cela peut être attribué principalement à la position de fixation Zs de l'élément de support en forme d'anneau, tandis que les positions où les jauges de contrainte sont collées, ont également un effet. En ce qui concerne la diminution du signal de détection provoquée par l'utilisation d'une structure à double

cylindre, la sensibilité au signal est renforcée par la détection différentielle du signal de phase inverse.

Ensuite, on a essayé de préparer une carte d'étalonnage pour le présent prototype. Comme décrit précédemment, le terme de "carte d'étalonnage" se réfère à une carte de conversion qui sert à calculer les composantes  $\epsilon_x$  et  $\epsilon_y$ , à partir du traitement primaire des sorties ( $\delta_j$ ) des jauges de contrainte respectives, et à la réalisation d'une conversion effectuée à partir des positions des points d'intersection sur le plan horizontal, avec la composante  $\epsilon_x$  prise sur l'axe horizontal et la composante  $\epsilon_y$  prise sur l'axe vertical, pour passer à la grandeur et à la direction du vecteur de charge. Pour préparer une carte d'étalonnage, il faut clarifier le nombre de jauges de contrainte requises. Par suite, les résultats qui étaient obtenus lorsque la grandeur de contrainte mesurée dans le cas d'une rotation à vitesse constante en appliquant une charge spécifiée au présent prototype, était soumise à une analyse par transformation de Fourier rapide (FFT), sont représentés dans la figure 14-1. L'axe horizontal représente le nombre d'harmoniques plus élevés pour la fréquence de rotation.

On constate d'après la figure 14-1 que le présent prototype comporte jusqu'à deux composantes harmoniques plus élevées. Par suite, comme le procédé à deux jauges est utilisé selon le procédé d'analyse de sortie indiqué ci-dessus, il faut utiliser quatre ensembles de jauges de contrainte, pour un total de huit jauges de contrainte. La figure 14-2 représente donc les résultats qui étaient obtenus lorsqu'un test d'étalonnage était effectué dans un environnement à la température ordinaire, en utilisant quatre ensembles de jauges de contrainte, et lorsqu'une carte d'étalonnage était préparée en effectuant un traitement primaire. Les résultats indiqués correspondent à un cas dans lequel on faisait varier la charge de 100 kgf à 500 kgf par unités de 10 kgf. Idéalement, ces résultats devraient se présenter sous la forme de cercles concentriques. La raison de la forme distordue vient de variations dans la structure telles que la manière d'appliquer les jauges de contrainte et analogues. Lorsque la cartouche de palier de la présente invention est en cours de préparation, il faut préparer les cartes d'étalonnage pour les cartouches individuelles, celles-ci comprenant des cartes dans des environnements à température extrêmement basse.

Le présent prototype a également été soumis à un test utilisant un appareil de test de palier à température cryogénique. Les résultats

obtenus sont décrits ci-après. Ce test a été effectué pour vérifier si des valeurs mesurées correctes ou non sont indiquées par la cartouche de type à double cylindre du présent mode de réalisation lorsqu'une charge unidirectionnelle est appliquée à la partie centrale de l'axe de rotation au moyen d'un piston appliquant une charge radiale, et pour vérifier quel type de valeurs mesurées est représenté lorsqu'une masse de déséquilibre est appliquée.

La figure 15 représente les conditions de test utilisées et les résultats obtenus lorsqu'une charge unidirectionnelle a été appliquée au moyen d'un piston d'application de charge radiale de type à gaz sous pression, et la figure 16 représente les conditions de test utilisées et les résultats obtenus lorsqu'une masse de déséquilibre a été appliquée. Dans le test représenté à la figure 15, on faisait tout d'abord passer de l'azote liquide à travers le palier de façon que la partie de cartouche de type à double cylindre soit placée dans un état à température cryogénique, puis une force de pression était appliquée à la partie de cylindre extérieur de la cartouche de type à double cylindre par l'intermédiaire de deux broches, en créant ainsi un état dans lequel une charge était appliquée au palier par le dessus.

La figure 15-2 est une vue de côté, la figure 15-1 est une vue en coupe suivant la ligne a-a, et la figure 15-3 est un graphique représentant les résultats des mesures. Comme représenté dans le graphique de la figure 15-3, les valeurs mesurées, obtenues à partir de la cartouche de type à double cylindre montée dans le palier côté turbine, lorsqu'on appliquait des pressions de piston de 6 kgf/cm<sup>2</sup>, 8 kgf/cm<sup>2</sup> et 10 kgf/cm<sup>2</sup>, tandis que le côté de l'arbre était entraîné en rotation dans cet état, sont réparties dans une zone spécifiée. L'axe X correspond à la direction verticale dans l'appareil et l'axe Y correspond à la direction horizontale. En ce qui concerne la manière d'appliquer la charge unidirectionnelle par le piston d'application de charge radiale, on utilisait une structure dans laquelle la charge de piston était appliquée à l'une seulement des deux broches, tandis que l'autre broche était fixée, comme représenté dans la figure 15-1 ; par suite, la charge appliquée ne coïncidait pas complètement avec la direction vers le bas (axe X), mais présentait au contraire une légère inclinaison d'un angle  $\theta$ .

Le fait que les valeurs mesurées ne présentent pas une valeur fixe (ponctuelle) pour toutes les directions de rotation, mais forment au contraire un groupe réparti à l'intérieur d'une zone spécifiée, est inter-



prété comme pouvant être attribué au fait que la vibration synchronisée en rotation est générée par un léger déséquilibre du système d'arbre, ainsi qu'au fait qu'il existe également un léger effet résiduel de la différence entre le cas indiqué ci-dessus dans lequel les jauges de contrainte  
5 sont disposées entre les billes de roulement, et le cas dans lequel les positions des jauges de contrainte et des billes de roulement coïncident également dans le présent mode de réalisation.

La figure 16 représente les conditions de test qui étaient utilisées lorsqu'on appliquait une masse de déséquilibre. Comme on  
10 peut le voir d'après la vue latérale de la figure 16-1, la masse de déséquilibre était appliquée à la partie supérieure dans les figures. Cette masse de déséquilibre appliquée tourne solidairement de l'arbre et applique une force centrifuge à la partie centrale de l'axe de rotation. Comme dans le test précédent, on plaçait la partie de cartouche de type à double cylindre dans un état à température cryogénique en faisant passer de l'azote  
15 liquide à travers le palier. Les valeurs mesurées qu'on obtenait lorsqu'on faisait tourner cette masse de déséquilibre à une vitesse élevée de 5000 tours/mn, sont indiquées dans le graphique de la figure 16-2. Dans ce graphique, les valeurs mesurées pour deux vitesses de rotation dans un  
20 état de rotation stable, sont tracées en coordonnées graphiques. Le fait que ces valeurs mesurées pour deux vitesses de rotation présentent une certaine variation par rapport à la valeur de  $\theta$  est également interprété comme pouvant être attribuée au fait que les positions des jauges de contrainte et des billes de roulement ont un effet différent à chaque vitesse de  
25 rotation.

Il se confirmait d'après les tests ci-dessus qu'on pouvait obtenir un système permettant de surmonter les problèmes d'un appareil conventionnel et permettant de mesurer séparément la charge radiale et le moment de charge agissant sur le palier, tandis que les sorties des jauges  
30 de contrainte n'étaient pratiquement pas affectées par les positions des billes de roulement.

Le système de mesure de charge de palier de la présente invention est un système qui utilise une cartouche de palier comme cellule de charge pour mesurer la charge de palier dans des machines rotatives  
35 utilisant des paliers radiaux comportant des billes de roulement. Cette cartouche de palier est construite sous la forme d'une cartouche de type à double cylindre comprenant une partie cylindrique intérieure qui vient en contact avec le palier par l'intérieur, et une partie cylindrique extérieure

qui est reliée à la partie cylindrique intérieure par un élément de support en forme d'anneau. Comme la charge de palier est mesurée au moyen de jauges de contrainte disposées sur la surface de la partie cylindrique extérieure indiquée ci-dessus, on peut effectuer une détection qui n'est pas affectée par une variation des positions relatives des billes de roulement du palier et des jauges de contrainte.

De plus, en réglant les positions dans lesquelles les jauges de contrainte sont disposées dans la direction axiale, de façon qu'elles se situent en deux points où la phase de la contrainte est différente et où la contrainte est grande, d'après la relation entre la grandeur de contrainte et la position sur la surface supérieure de la cartouche dans la direction axiale lorsqu'une charge spécifiée est appliquée dans la direction radiale, dans une analyse par le procédé à éléments finis et de manière à satisfaire la condition selon laquelle il n'y a que peu d'effet lorsqu'on fait varier le moment de charge, il est possible d'effectuer une détection à haute sensibilité qui n'est pratiquement pas affectée par le moment de charge, et qui est basée sur le procédé à jauges en deux points.

En outre, en réglant le nombre de jauges de contrainte comme un nombre consistant en une pluralité d'ensembles disposés dans la direction circonférentielle, de façon que chaque ensemble consiste en une paire de jauges de contrainte dans des positions dans lesquelles la phase est différente dans la direction axiale, il est possible de préparer une carte d'étalonnage au moyen d'essais.

Dans la présente invention, la position de montage, dans la direction axiale, de l'élément en forme d'anneau qui relie la partie cylindrique intérieure à la partie cylindrique extérieure, est déterminée en utilisant comme norme l'effet minimum du moment de charge de la contrainte dans la direction circonférentielle. Par suite, l'amplitude de la charge radiale peut être déterminée d'une manière qui n'est pratiquement pas affectée par le moment de charge.

De plus, on peut mesurer le moment de charge en disposant des jauges de contrainte sur la surface extérieure de la partie cylindrique extérieure dans les positions, par rapport à la direction axiale, qui sont les plus sensibles à l'effet du moment de charge, et en comparant les sorties de ces jauges de contrainte avec les sorties des jauges de contrainte disposées dans les positions où l'effet du moment de charge est minimum. Plus spécifiquement, on a montré que la charge radiale et le moment de charge agissant sur le palier, peuvent être mesurés séparé-

ment au moyen d'un système de mesure de charge de palier utilisant une cartouche de type à double cylindre.

La cartouche de la présente invention permet de mesurer séparément les valeurs de charge de palier sans faire de sacrifices quel-  
5 conques en termes de poids et de place ; par suite, si la cartouche de la présente invention est utilisée dans des paliers aérospatiaux dans lesquels la miniaturisation et la réduction de poids sont recherchés à un point ex-  
trême, en particulier dans les turbopompes de fusées et analogues, les di-  
verses forces agissant sur ces paliers peuvent être mesurées directement  
10 et séparément, de sorte qu'on peut obtenir une information précieuse pour spécifier les causes de problèmes de vibrations radiales. En même temps, on peut améliorer considérablement la fiabilité de ces turbopompes com-  
parativement aux techniques conventionnelles, de sorte qu'une voie ma-  
jeure est ouverte pour une réutilisation dans le futur.

### REVENDICATIONS

1°) Système de mesure de charge de palier qui utilise une cartouche de palier (1) comme cellule de charge pour mesurer la charge de palier dans une machine rotative utilisant un palier radial comportant des billes de  
5 roulement,

caractérisé en ce que

la cartouche de palier (1) est construite sous la forme d'une cartouche de type à double cylindre constituée d'une partie cylindrique intérieure (13) venant en contact interne avec le chemin de roulement extérieur dans le-  
10 quel passent les billes de roulement, et d'une partie cylindrique extérieure (11) qui est reliée à la partie cylindrique intérieure (13) par un élément de support en forme d'anneau (14) ; et

la charge de palier est mesurée par des jauges de contrainte (5) qui sont disposées sur la surface de la partie cylindrique extérieure.

15

2°) Système de mesure de charge de palier selon la revendication 1, caractérisé en ce que

les positions dans lesquelles sont disposées les jauges de contrainte (5) sont définies comme deux points où la phase de la contrainte est diffé-  
20 rente et où la contrainte est grande d'après la relation entre la grandeur de contrainte et la position située sur la surface supérieure de la cartouche (1) dans la direction axiale lorsqu'une charge spécifiée est appliquée dans la direction radiale, dans une analyse effectuée par le procédé à éléments finis, et qui satisfait la condition selon laquelle il n'y a que peu  
25 d'effet lorsqu'on fait varier le moment de charge en faisant varier le point d'application de la charge dans la direction axiale.

3°) Système de mesure de charge de palier selon la revendication 2, caractérisé en ce que

30 le nombre de jauges de contrainte (5) est un nombre consistant en une pluralité d'ensembles disposés dans la direction circonférentielle, chaque ensemble consistant en une paire de jauges de contrainte dans des positions dans lesquelles la phase est différente dans la direction axiale.

35 4°) Système de mesure de charge de palier selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que

la position de montage, dans la direction axiale, de l'élément de support en forme d'anneau (14) qui relie la partie cylindrique intérieure (13) à la partie cylindrique extérieure (11), est déterminée de façon que l'effet du moment de charge de la contrainte dans la direction circonférentielle soit  
5 minimum.

5°) Système de mesure de charge de palier selon la revendication 4, caractérisé en ce que

les jauges de contrainte (5) sont disposées sur la surface extérieure de la  
10 partie cylindrique extérieure (11) dans des positions axiales qui reçoivent l'effet maximum du moment de charge ; et

le moment de charge est mesuré à partir de la différence de sortie entre ces jauges de contrainte et les jauges de contrainte disposées dans les positions où l'effet du moment de charge est minimum.

15

1/6

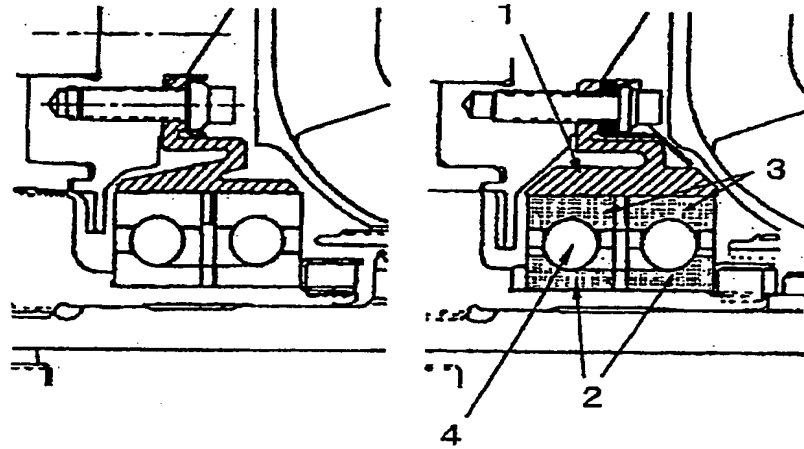


Fig. 1

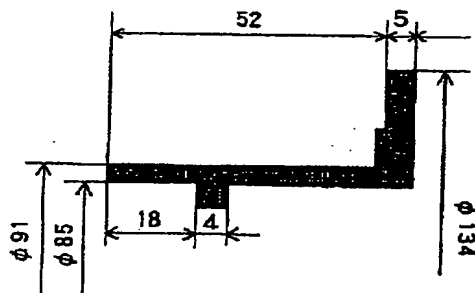


Fig. 2

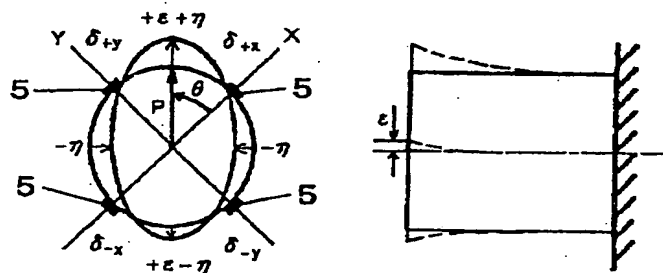
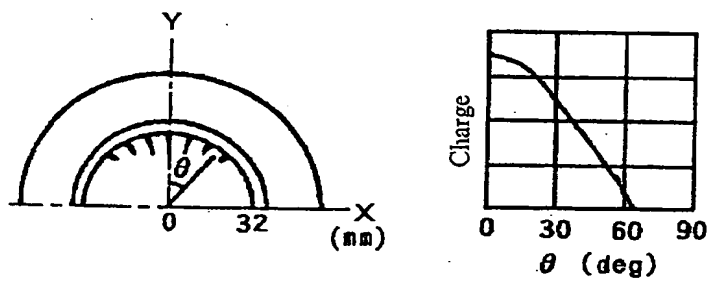
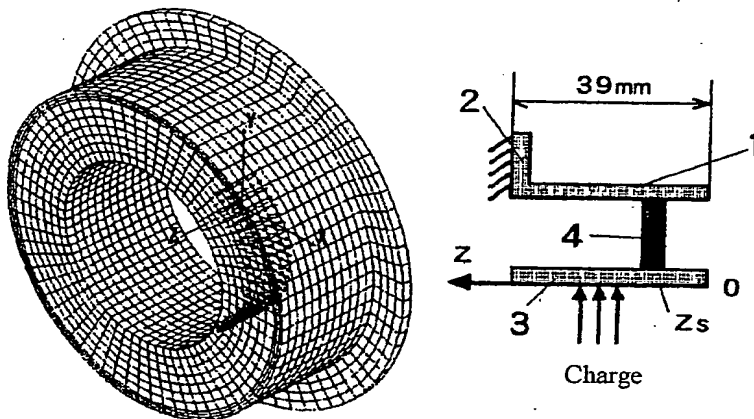
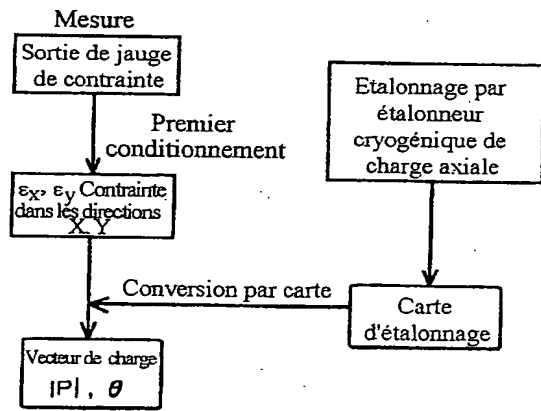
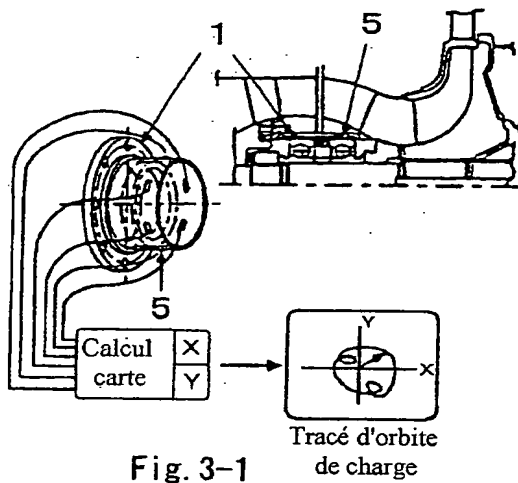


Fig. 4

$\varepsilon$  : Déplacement de  
l'axe d'isolateur

$\eta$  : Déplacement de la  
distorsion de surface  
elliptique



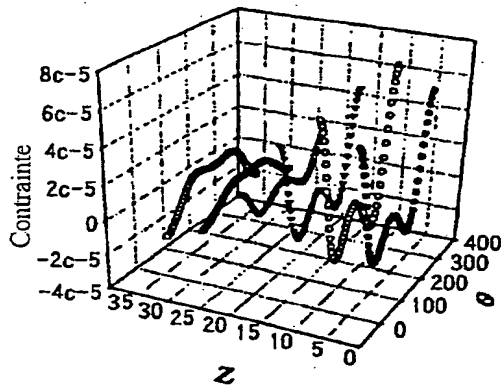


Fig. 7-1

Contrainte de direction de circuit  
sur la surface de cartouche

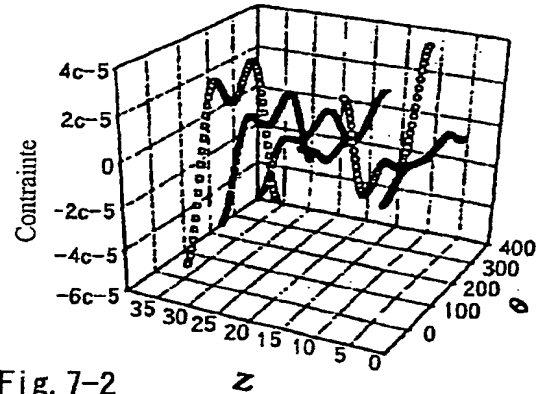


Fig. 7-2

Contrainte de direction axiale  
sur la surface de cartouche

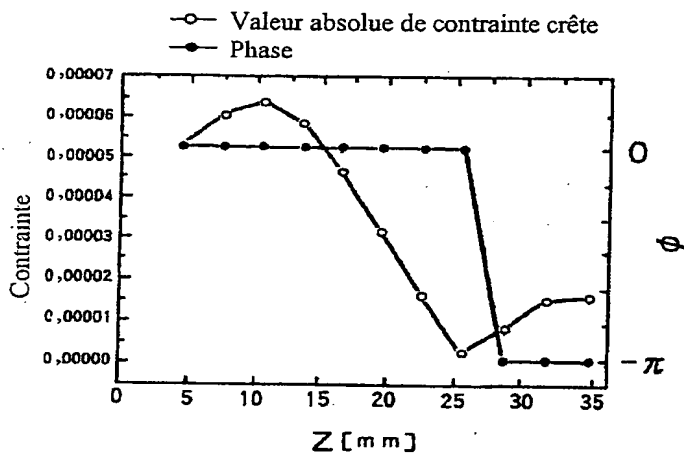
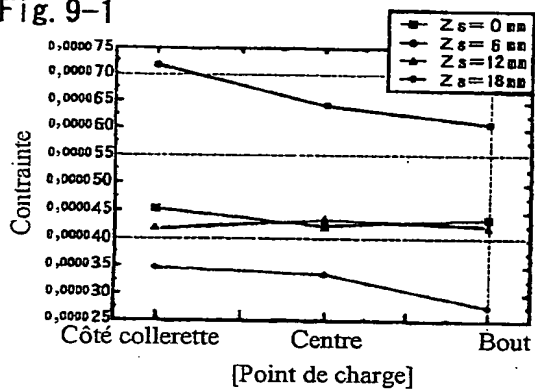


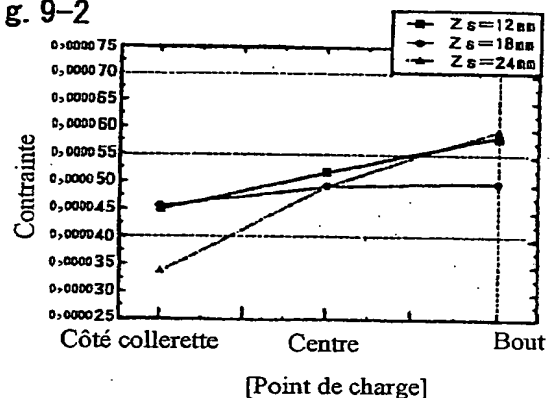
Fig. 8 Variation de contrainte et de phase sur la surface de cartouche

Fig. 9-1



Moment de charge de contrainte de  
direction de circuit

Fig. 9-2



Moment de charge de contrainte  
de direction axiale



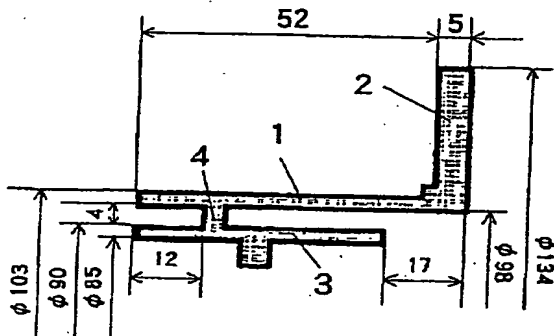


Fig. 10-1

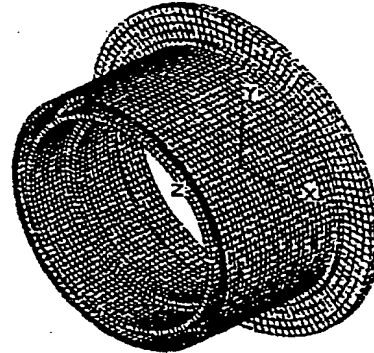


Fig. 10-2

Point de charge

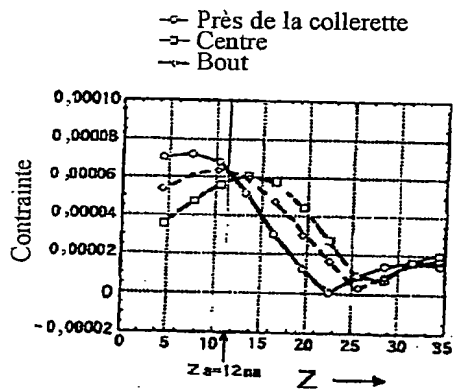


Fig. 11-1

Prise de charge

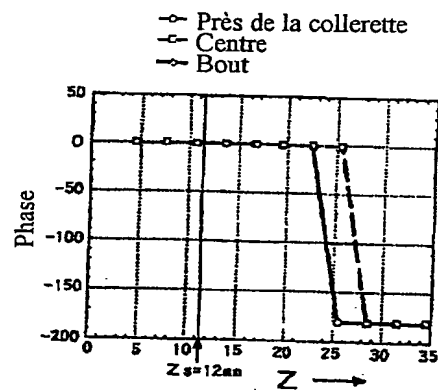


Fig. 11-2

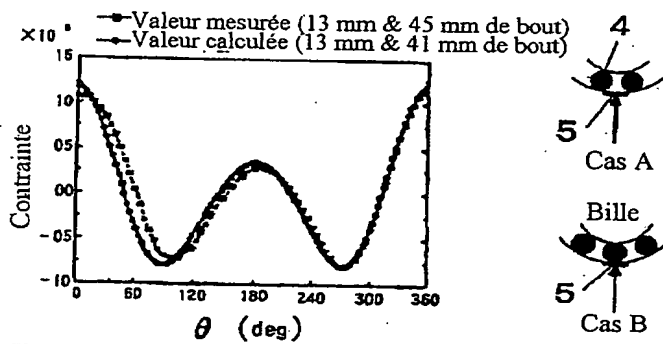


Fig. 13-1

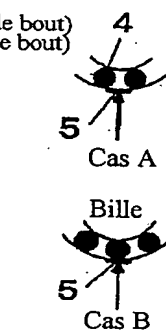


Fig. 13-2

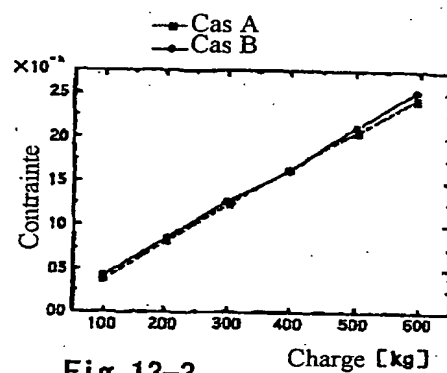


Fig. 13-3

Fig. 12-1

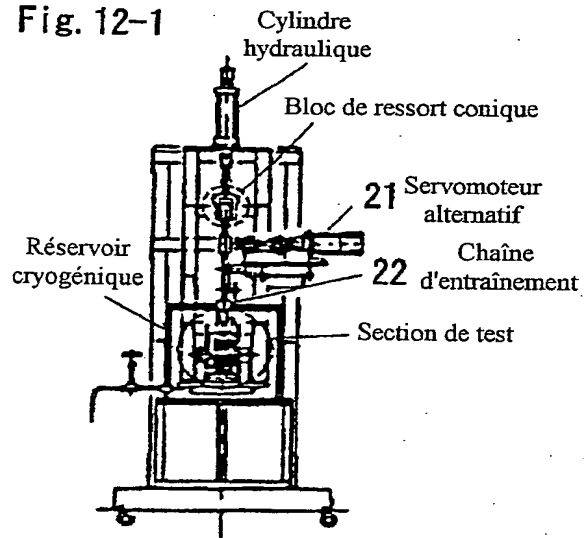
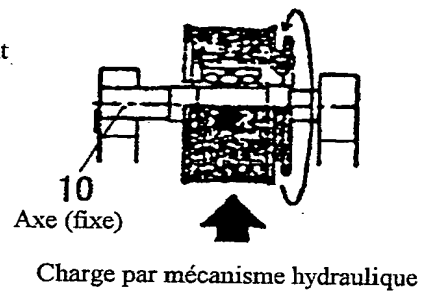


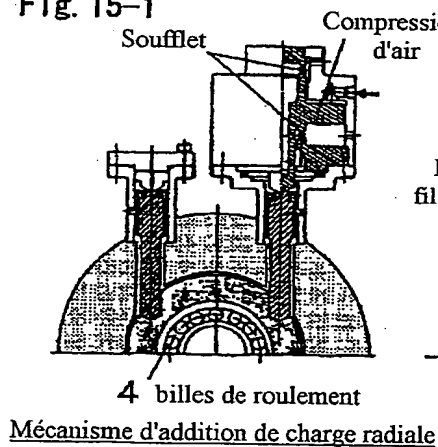
Fig. 12-2

Porte-palier et cartouche de palier  
(rotation anneau extérieur)



Ensemble d'étalonnage et test de charge axiale

Fig. 15-1



Mécanisme d'addition de charge radiale

Fig. 15-2

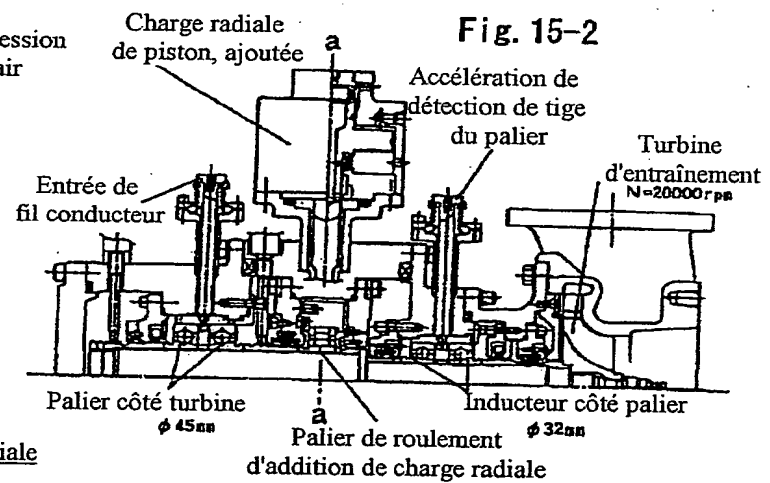
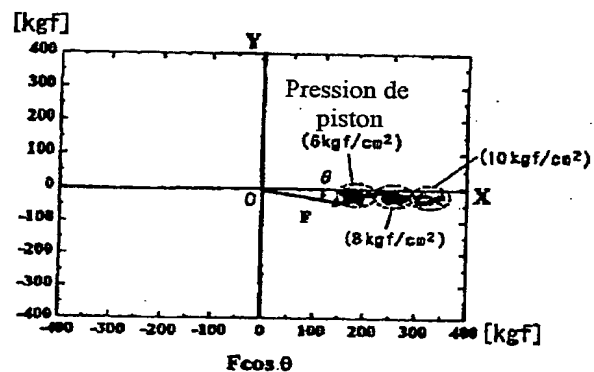


Fig. 15-3



Position de cage de contrainte :  $Z = 13\text{mm}$  et  $45\text{mm}$

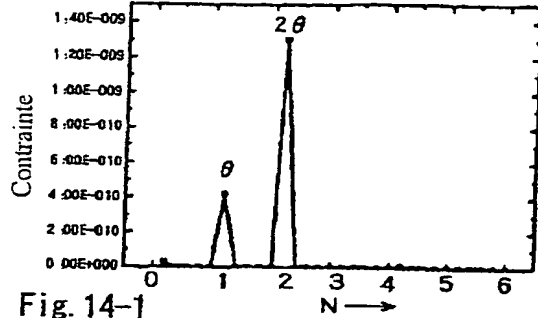


Fig. 14-1

Fig. 14-2

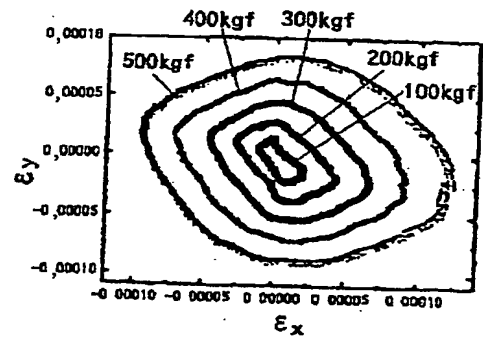


Fig. 16-1

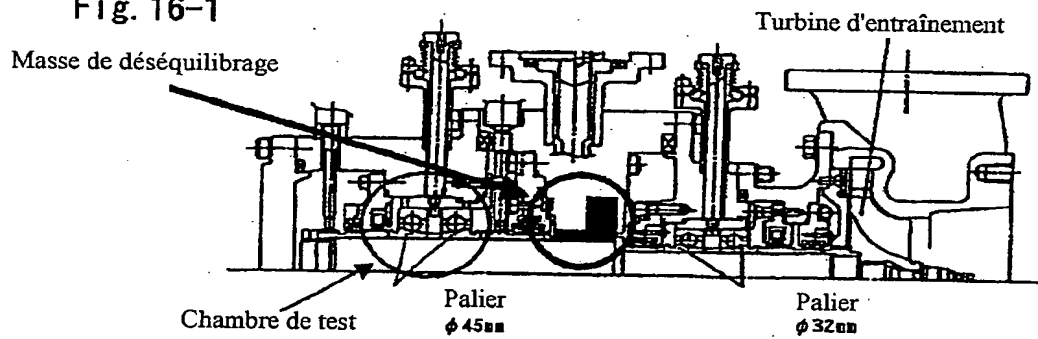
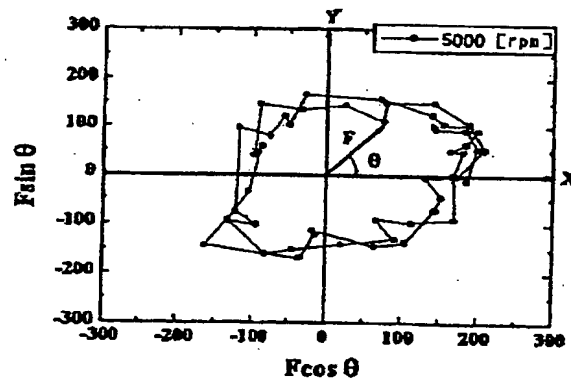


Fig. 16-2



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**